

CALIBRAÇÃO DE ERROS SISTEMÁTICOS EM ACELERÔMETROS MEMS

Systematic Errors Calibration for MEMS Accelerometers

Stefanie Von Randow de Souza¹

Álvaro Muriel Lima Machado¹

¹Universidade Federal do Paraná - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - Caixa Postal 19001 – 81531-990 – Curitiba – PR, Brasil
Email: stefanie.vrs@gmail.com; alvaroml@ufpr.br

Resumo:

Os sensores inerciais MEMS de baixo custo apresentam grandes vantagens para diversas aplicações em navegação, porém estes dispositivos são caracterizados por diversos tipos de erros. Através de procedimentos específicos como a calibração é possível obter resultados com melhor acurácia. Neste artigo utilizou-se o Método de Calibração Multi-Posições Modificado, que permite determinar erros sistemáticos, tais como deriva, erro de fator de escala e de não-ortogonalidade. O método, o procedimento e as equações desta calibração são brevemente descritos. Primeiramente foi realizada a calibração com diferentes acelerômetros. O desempenho dos parâmetros de calibração foi verificado por meio de um teste em campo, comparando as trajetórias calculadas pelas acelerações antes e após as correções. Após a correção das acelerações com os parâmetros de calibração, foram verificadas algumas discrepâncias nas trajetórias. Ainda assim houve uma melhora significativa na solução final. A vantagem deste método consiste no fato de que este não requer o uso de equipamentos especiais ou de um preciso alinhamento dos sensores, podendo ser aplicado em campo antes da utilização dos sensores.

Palavras-chave: *Calibração; Acelerômetros; Erros Sistemáticos; MEMS; INS.*

Abstract:

The low-cost inertial sensors MEMS are very advantageous for several applications in navigation, however these devices are characterized by several types of errors. By performing specific procedures such as calibration it is possible to obtain results with better accuracy. In this paper, it has been used the Modified Multi-Position Calibration Method, which allows to determine systematic errors, like bias, scale factor error and misalignment of the axes error. This method, the procedure and the equations of this calibration are shortly described. First of all, a

calibration of different accelerometers has been made. The performance of the calibration parameters was verified by a field test, comparing the trajectories calculated by the accelerations before and after the corrections. After correction of the accelerations with the calibration parameters, were verified some discrepancies in the trajectories. Still, there was a significant improvement in the final solution. The advantage of this method is that it does not require the use of special equipment or precise alignment of the sensors. It can be applied in the field before the use of the sensors.

Keywords: *Calibration; Accelerometers; Systematic Errors; MEMS; INS.*

1. Introdução

A Navegação Inercial permite a determinação de posição, velocidade e atitude de uma plataforma em movimento, por meio da integração das acelerações e velocidade angulares medidas por sensores, respectivamente acelerômetros e giroscópios. Na Geodésia, os Sistemas de Navegação Inercial – INS (*Inertial Navigation Systems*) apresentam particular importância para integração com outras técnicas de posicionamento, como o GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*). O uso de diferentes técnicas integradas permite aumentar a qualidade e a confiabilidade das medidas. No caso da integração GNSS/INS, as características de operação de tais tecnologias são distintas e complementares (Lima, 2005). O GNSS necessita de sinais de satélites sujeitos a interferências enquanto o inercial é um sistema autocontido, ou seja, independe de sinais externos. Por outro lado, os sensores inerciais acumulam erros de observação de forma contínua enquanto o GNSS fornece medições com erros aleatórios, dentro de um certo limite, ao longo do tempo. Desta forma, a integração de diferentes sistemas permite minimizar as deficiências de cada técnica e maximizar o desempenho final no posicionamento.

Porém, de acordo com Durão (2009), a aquisição de um INS de alto desempenho apresenta duas características que normalmente comprometem a sua utilização, a saber, o alto custo (maior que US\$ 300.000,00), e uma regulamentação rígida que restringe as aplicações desses sistemas a atividades militares. Uma alternativa de baixo custo com crescentes aplicações são os sistemas inerciais baseados em Sistemas MicroEletroMecânicos (MEMS – *MicroElectroMechanical Systems*). Estes possuem como vantagens um menor custo, dimensões reduzidas e fácil acesso ao público civil. Entretanto, as medidas dos sensores inerciais MEMS são fortemente afetadas por diferentes fontes de erros sistemáticos e aleatórios.

Os erros sistemáticos são causados por imperfeições físicas na construção do sistema sendo o principal erro conhecido como deriva. Os erros aleatórios são causados por ruídos de diversas fontes. Quando se almeja o emprego de sensores inerciais MEMS com resultados razoáveis, é necessário o conhecimento de parâmetros de erros dos sensores. A realização de procedimentos de calibração permite estimar os principais erros sistemáticos dos sensores inerciais.

Diversos métodos de calibração têm sido desenvolvidos, sendo alguns voltados para aplicações específicas e integração com outros sensores. Como exemplo, pode-se citar a calibração voltada à integração de INS com GPS (Hol, 2011), câmeras (Bender *et al.*, 2013), veículos autônomos submarinos (Tang *et al.*, 2013) e veículos aéreos não tripulados do tipo *drone* (Henriques, 2011). Outros métodos de calibração e modelagem são mais generalizados, tendo como foco o tipo de

erro a ser calibrado. Estes erros podem ser aleatórios (Tamazin *et al.*, 2013), sistemáticos (Ferguson, 2015) ou termal (Niu *et al.*, 2013).

A maioria dos métodos de calibração são realizados em laboratório por meio de equipamentos robóticos, conforme pode-se verificar em Aydemir e Saranlb (2012), Lambrecht *et al.* (2016) e Guan *et al.* (2015). Estes equipamentos, em geral, possuem um custo bastante elevado, resultando em uma calibração de alto custo. Lötters *et al.* (1998) propuseram um procedimento de calibração de acelerômetros utilizando apenas os sinais de saída dos acelerômetros em diferentes posições, sem qualquer dispositivo ou equipamento específico. A partir deste, diversos métodos de calibração têm sido desenvolvidos.

O Método de Calibração Multi-Posições (Shin e El Sheimy, 2001), foi desenvolvido para ser uma ferramenta eficiente e que pode ser aplicado em campo, sem a utilização de qualquer instrumento de calibração externa. Ao invés disso, são necessárias numerosas medidas de atitude do equipamento e utiliza-se a magnitude da gravidade como referência para a calibração de acelerômetros.

O presente trabalho teve como foco a realização e análise de testes para a determinação dos parâmetros dos principais erros sistemáticos que afetam os acelerômetros MEMS de baixo custo. Foi executada uma metodologia de calibração acessível e relativamente simplificada através do Método de Calibração Multi-Posições Modificado. Posteriormente, realizou-se um teste em campo com o objetivo de verificar a aplicação dos parâmetros de calibração calculados.

2. Erros Sistemáticos

Os sensores podem ser calibrados e compensados a partir dos sinais de saída medidos pelos sensores. Os principais erros sistemáticos são: Deriva, Erro de Fator de Escala e Erro de Não-Ortogonalidade.

A Deriva é uma discrepância entre as forças atuantes nos acelerômetros e as acelerações medidas, Figura 1a. Segundo Titterton e Weston (2004), a deriva dos acelerômetros é um deslocamento do zero na medição da força específica que está presente quando a aceleração aplicada é zero. De acordo com Groves (2008), a deriva é composta de uma componente estática e uma dinâmica. A componente estática permanece constante durante o período de funcionamento do inercial mas apresenta variações para diferentes operações do equipamento. Já a componente dinâmica apresenta variações de períodos da ordem de um minuto. A deriva dinâmica também incorpora a deriva dependente da temperatura residual remanescente após a calibração do sensor.

O Erro de Fator de Escala é a taxa entre uma mudança no sinal de entrada e uma mudança no sinal de saída, conforme Figura 1 (b). Um sensor ideal tem um fator de escala igual a 1. Desta forma, qualquer fator de escala diferente de 1 está contaminado (Aggarwal *et al.*, 2010).

O Erro de Não-Ortogonalidade ocorre a partir do desalinhamento dos eixos sensíveis dos sensores inerciais nos eixos x, y e z (respectivamente x_{ac} , y_{ac} e z_{ac}) com relação aos eixos ortogonais x, y, e z do referencial da plataforma (respectivamente x_p , y_p e z_p), conforme Figura 1c. Este desalinhamento está presente em todos os sistemas inerciais devido a limitações no processo de fabricação.

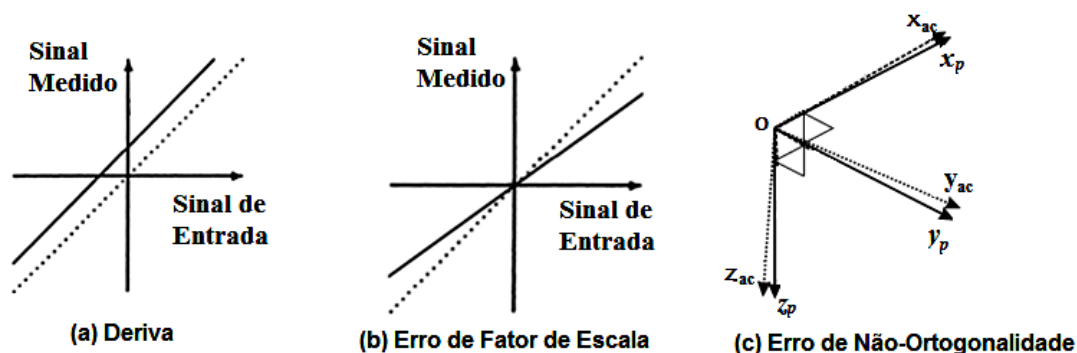


Figura 1: (a) Deriva, (b) Erro de Fator de Escala e (c) Erro de Não-Ortogonalidade

Fonte: Adaptado de Grewal e Andrews (2007)

Os sensores MEMS também são afetados por erros causados pela mudança de temperatura, sendo mais evidentes em sensores MEMS de baixo custo (Aggarwal *et al.*, 2010). Estas variações podem ser estimadas por testes térmicos que medem as discrepâncias dos parâmetros básicos do sensor quando este opera sob diferentes temperaturas.

3. Calibração dos Erros Sistemáticos

O Método de Calibração Seis Posições (Aggarwal *et al.*, 2008) é uma proposta semelhante ao método apresentado por Lötters *et al.* (1998). Este método requer que os sensores sejam instalados em uma superfície perfeitamente nivelada com relação à gravidade e alinhados segundo direções específicas. Em seguida, deve-se proceder à coleta de dados com cada um dos três eixos alinhados alternativamente para cima e para baixo, realizando rotações de 180° entre uma posição e outra. Para uma tríade de sensores ortogonais isso resulta em um total de seis posições.

Segundo Artese e Trecroci (2008), este é um procedimento muito delicado, de alto custo e difícil de ser realizado com um sistema inercial MEMS de baixo custo. Com o objetivo de desenvolver uma metodologia de calibração em que não seja necessário o alinhamento preciso dos sensores e de uma superfície perfeitamente nivelada, Shin e Al-Sheimy (2001) desenvolveram uma metodologia efetiva baseada em várias posições.

3.1 Método de Calibração Multi-Posições e Multi-Posições Modificado

Com base no Método de Calibração Seis Posições, Shin e El Sheimy (2001) realizaram uma adaptação deste método denominado Método de Calibração Multi-Posições. Neste método são necessárias no mínimo dezoito posições diferentes e independentes entre si. Artese e Trecroci (2008) citam que a grande vantagem do Método de Calibração Multi-Posições em relação aos

anteriormente citados consiste no fato de que são necessárias apenas as posições aproximadas do sensor. Além disso, não é necessário o conhecimento exato da atitude do sensor com relação aos três eixos do plano de referência.

No modo estacionário, a magnitude total que os acelerômetros sentem é a gravidade, independente da direção que os eixos são apontados. Um vetor no espaço R3 no referencial do sensor pode ser definido por três vetores unitários, conforme Equações (1), (2) e (3), respectivamente os vetores \vec{x} , \vec{y} e \vec{z} :

$$\vec{x} = (1,0,0) \quad (1)$$

$$\vec{y} = (0,1,0) \quad (2)$$

$$\vec{z} = (0,0,1) \quad (3)$$

Se uma tríade de acelerômetros fosse perfeitamente ortogonal, as acelerações em cada eixo com relação ao referencial de navegação seriam dadas por:

$$a_x = \langle -\vec{g}, \vec{x} \rangle = -g \cos \alpha \quad (4)$$

$$a_y = \langle -\vec{g}, \vec{y} \rangle = -g \cos \beta \quad (5)$$

$$a_z = \langle -\vec{g}, \vec{z} \rangle = -g \cos \gamma \quad (6)$$

onde \langle, \rangle é o produto interno, \vec{g} é a gravidade e α, β, γ são os ângulos entre a gravidade local e os eixos x, y e z dos sensores inerciais, respectivamente.

A partir das Equações (4), (5) e (6), Shin e El-Sheimy (2001) introduzem um modelo de calibração geral, conforme Equação 7. Os autores determinam que esta equação é válida independentemente do alinhamento com o referencial de navegação.

$$a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 = \|\vec{g}\|^2 (\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma) = \|\vec{g}\|^2 \quad (7)$$

Porém, como os sinais medidos pelos sensores não são perfeitos, é necessária a inserção das componentes de erros que afetam as medidas. Shin e El-Sheimy (2001) apresentam o desenvolvimento matemático para se chegar as componentes do vetor força específica, conforme equações:

$$a_x = \frac{Y_x - b_x}{1 + s_x} \quad (8)$$

$$a_y = a_x \tan \theta_{yz} + \frac{Y_y - b_y}{(1 + s_y) \cos \theta_{yz}} \quad (9)$$

$$a_z = -a_x \frac{\tan \theta_{zy}}{\cos \theta_{zx}} + a_y \tan \theta_{zx} + \left(\frac{Y_z - b_z}{(1 + s_z) \cos \theta_{zx} \cos \theta_{zy}} \right) \quad (10)$$

onde, Y_i é a aceleração observada, b_i é a deriva, s_i é o erro de fator de escala e θ_i é o erro de não-ortogonalidade.

A partir da Equação (7), Shin e El-Sheimy (2001) produziram um modelo de calibração para os acelerômetros conforme equação abaixo:

$$f = a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 - \|g\|^2 = 0 \quad (11)$$

Substituindo as Equações (8), (9) e (10) na Equação (11), se obtém um modelo de calibração que inclui todos os nove parâmetros de erro, conforme:

$$f = \left(\frac{Y_x - b_x}{1 + s_x} \right)^2 + \left(\tan \theta_{yz} \frac{Y_x - b_x}{1 + s_x} + \frac{1}{\cos \theta_{yz}} \frac{Y_y - b_y}{1 + s_y} \right)^2 +$$

$$\left[\left(\tan \theta_{zx} \tan \theta_{yz} - \frac{\tan \theta_{zy}}{\cos \theta_{zx}} \right) \left(\frac{Y_x - b_x}{1 + s_x} \right) + \frac{\tan \theta_{zx}}{\cos \theta_{yz}} \left(\frac{Y_y - b_y}{1 + s_y} \right) + \right.$$

$$\left. \frac{1}{\cos \theta_{zx} \cos \theta_{zy}} \left(\frac{Y_z - b_z}{1 + s_z} \right) \right]^2 - \|g\|^2 = 0 \quad (12)$$

Para evitar singularidade ao inverter a matriz normal é necessário que muitas observações sejam feitas. No caso de uma tríade de acelerômetros, tipicamente, são estimadas três derivas, três erros de fatores de escala e três erros de não-ortogonalidade, o que implica em um mínimo de dez diferentes atitudes para ser aplicado um ajustamento. Na prática, são necessárias mais do que 18 posições em várias atitudes para se obter resultados confiáveis. Syed *et al.* (2007) executou 26 diferentes atitudes, sendo 6 posições com cada face do inercial apontando para baixo, 12 posições com cada aresta apontando para baixo e depois 8 posições com as quinas apontando para baixo. O ângulo entre duas posições sucessivas é de aproximadamente 45°. A Figura 2 ilustra as (a) faces, (b) arestas e (c) quinas de um sistema inercial.

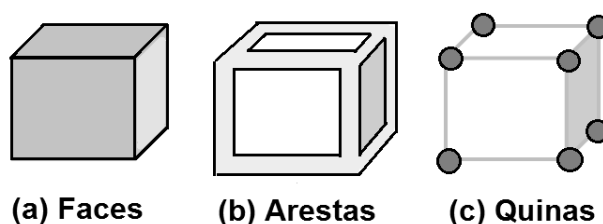


Figura 2: (a) Faces, (b) Arestas e (c) Quinas de um Sistema Inercial

Este modelo é indicado para calibração de sensores de alta precisão, havendo obstáculos para dispositivos de baixa precisão. Não existe uma definição universalmente aceita para INS de alta, média e baixa precisão. Alguns autores adotam diferentes metodologias. Brown e Hwang (1997) define a qualidade de um INS com base nos parâmetros. Já Santana (2011) classifica os sensores de acordo com o tempo de navegação sem afetar a qualidade das observações, enquanto Groves (2008) define a precisão com base no preço da plataforma e com as aplicações a que se destinam. Neste trabalho, a expressão alta precisão é utilizada para definir uma medição cuja repetibilidade seja considerada elevada.

O Método de Calibração Multi-Posições apresenta ainda dificuldade de convergência da deriva e do erro de fator de escala no processo de ajustamento devido à falta de parâmetros iniciais estimados. Por este motivo, Syed *et al.* (2007) apresentam uma modificação para acelerômetros MEMS de baixo custo. Esta modificação consiste em se realizar um teste inicial alternando os eixos do sensor para cima e para baixo, de modo semelhante ao Método de Calibração Seis Posições. Desta forma é possível obter valores aproximados de deriva e de fator de escala. De acordo com o autor, esta pré-calibração melhora a convergência e diminui o número de iterações no ajustamento.

4. Descrição dos Equipamentos Testados

Foram testados os acelerômetros de três sistemas inerciais do tipo MEMS, Figura 3. Escolheu-se testar diferentes acelerômetros devido à necessidade de se verificar os resultados dos testes em sensores com diferentes tecnologias e aplicações. Na sequência são apresentadas as especificações técnicas destes sensores.

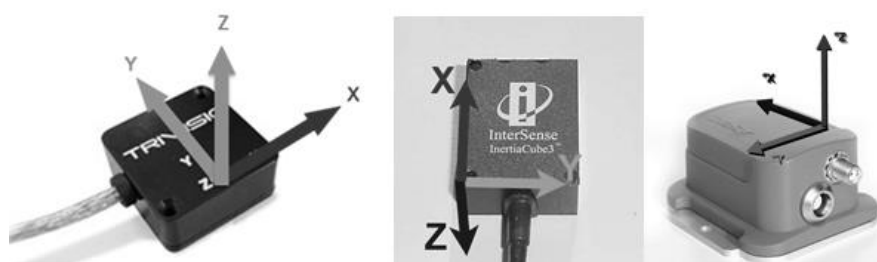


Figura 3: (a) Colibrí™, (b) InertiaCube3™ e (c) MTi-G™

Fonte: www.trivisio.com; www.intersense.com; www.xsens.com

De acordo com o fabricante, o Colibrí™, conforme Figura 3a, é indicado para aplicações em robótica, dispositivos para realidade virtual, consoles de videogames e controle de movimento com interface homem-máquina. Já o InertiaCube3™, Figura 3b, possui aplicações para simulação em biomecânica, joysticks de videogames e em aplicações industriais, enquanto o MTi-G™, Figura 3c, é indicado para aplicações em robótica, veículos autônomos e aeroespaciais. As Tabelas 1, 2 e 3 apresentam as especificações técnicas disponibilizadas pelos fabricantes dos dispositivos Colibrí™, InertiaCube3™ e MTi-G™, respectivamente.

Tabela 1: Especificações técnicas - Colibrí™

Fonte: <http://www.trivisio.com>

Acelerômetro	<p>Escala: $\pm 16\text{ g}$</p> <p>Resolução: 13 bits</p>
Frequência de Operação	$> 100\text{ Hz}$
Intervalo de func. temperatura	$0^{\circ}\text{C a } +70^{\circ}\text{C}$
Peso	22 gramas
Dimensões	30 x 13 x 30 mm

Tabela 2: Especificações Técnicas – Inertiacube3™
 Fonte: <http://www.intersense.com>

Predição	> 50 milisegundos
Latência Mínima	2 milisegundos
Frequência de Operação	> 180 Hz
Intervalo de func. temperatura	0°C a +50°C
Peso	86 gramas
Dimensões	60 x 35 x 20 mm

Tabela 3: Especificações Técnicas - MTi-G™
 Fonte: <http://www.xsens.com>

Acelerômetro	Estabilidade Bias: 0,02%
	Fator de Escala: 0,03%
	Ruído: 0,002 m/s ² /√Hz
	Bandwidth: 30 Hz
Frequência de Operação	> 512 Hz
Intervalo de func. temperatura	-20°C a +60°C
Peso	68 gramas
Dimensões	58 x 58 x 33 mm

5. Experimentos

5.1 Experimento 1 - Calibração pelo Método Multi-Posições Modificado

Para a coleta de dados em diferentes atitudes, não é necessário nenhum equipamento ou aparelho específico de calibração, uma vez que são necessários apenas ângulos aproximados. Para fins de praticidade, utilizou-se um cubo de acrílico de modo a auxiliar a coleta de dados nas 26 posições. A Figura 4 exemplifica a coleta de dados em algumas posições: (a) com as faces apontando para baixo, (b) as arestas e (c) as quinas apontando para baixo.

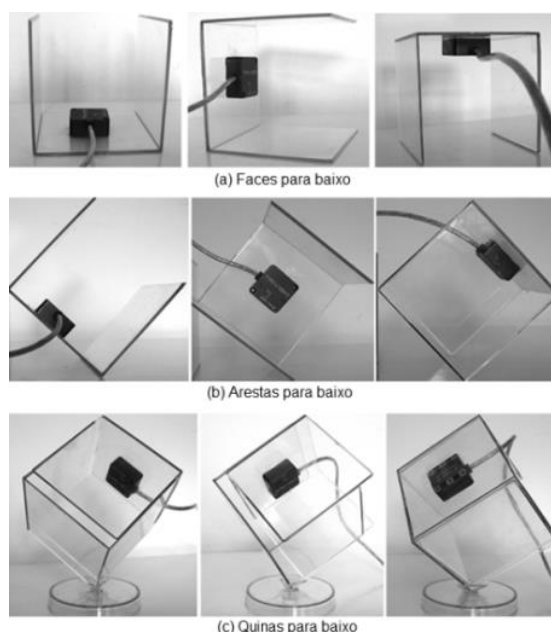


Figura 4: Coleta de dados para calibração – Colibri™

A fim de verificar a variabilidade dos resultados de um mesmo sensor, quando realizada a calibração em diferentes períodos de tempo, foram executados três ensaios com intervalos de 1-2 horas entre eles. Em cada ensaio foram coletados os dados de aceleração por um período de tempo de 40 segundos a 1 minuto em cada uma das 26 posições. O processamento foi realizado a partir de um algoritmo implementado pelos autores em ambiente Matlab 2012B.

5.2 Experimento 2 - Teste de Verificação

Este teste teve como objetivo verificar a aplicação dos parâmetros de calibração por meio das distâncias calculadas pelas acelerações corrigidas. Para tal, tomou-se como referência a mesma trajetória descrita via GNSS pelo método relativo cinemático. Uma vez que o objetivo do teste era o de apenas comparar distâncias, os acelerômetros foram testados de forma autônoma, ou seja, sem o apoio de sensores externos ou de observações gravimétricas. Com os sensores em repouso, partiu-se de um ponto inicial e percorreu-se uma trajetória aproximadamente retangular até retornar ao ponto inicial, conforme pode ser visualizado na Figura 5. A área escolhida para a realização do experimento foi no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR).



Figura 5: Trajetória usada para aplicação do teste de deslocamento

Durante o teste, as plataformas inerciais foram fixadas à lateral da antena GPS tomando o cuidado para evitar rotação, uma vez que estas não foram consideradas no pós-processamento. As antenas GNSS são pouco sensíveis para pequenas rotações em torno do seu eixo vertical, desta forma, apesar de haver rotações residuais, estas não foram consideradas na análise uma vez que os resultados obtidos com os acelerômetros empregados neste trabalho podem ser considerados de baixa qualidade com relação aos dados GNSS, de modo que tais pequenas rotações não serão significativas.

Os deslocamentos foram calculados a partir das acelerações por meio de técnicas de integração e filtragem. Na sequência, as acelerações foram corrigidas dos erros de deriva, de fator de escala e de não-ortogonalidade por meio da aplicação dos parâmetros calculados conforme Equações (8), (9) e (10). Desta forma, os deslocamentos foram recalculados utilizando as acelerações corrigidas.

Com o objetivo de facilitar a representação e visualização das trajetórias, as coordenadas do percurso GPS foram transformadas para referencial local. O levantamento com os acelerômetros foi executado sem uma referência externa. Porém, uma vez que nos interessa apenas as distâncias calculadas, o primeiro ponto do deslocamento via aceleração foi forçado a coincidir com o primeiro ponto do deslocamento de referência, assim como sua orientação inicial nos primeiros pontos do percurso.

6. Resultados e Discussões

As Tabelas 4, 5 e 6 apresentam os resultados das calibrações dos acelerômetros Colibri™, InertiaCube3™ e MTi-G™, respectivamente. Estes resultados têm em comum o fato de que as maiores variações de uma calibração para outra são observadas para a deriva. Por outro lado, para os erros de fator de escala e de não-ortogonalidade é possível observar maior uniformidade, sendo que este último apresenta pouca ou nenhuma variação de um ensaio para o outro.

Dentre os dispositivos testados, as maiores variações de um ensaio para o outro foram observadas para os acelerômetros Colibri™, enquanto os resultados dos acelerômetros MTi-G apresentam menor variabilidade.

Tabela 4: Calibração pelo Método Multi-Posições Modificado – Colibri™

Colibri					
Erro	Eixo	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Desvio Padrão
Deriva (g)	x	-0,06996	-0,05108	-0,06502	8×10^{-3}
	y	0,03056	0,16336	-0,01878	$7,7 \times 10^{-2}$
	z	0,05925	-0,11613	0,28604	0,16432
Erro de Fator de Escala (10^3 ppm)	x	-1,99803	-1,99853	-1,99943	$6,1 \times 10^{-4}$
	y	-1,01161	-1,03752	-1,0123	$1,2 \times 10^{-2}$
	z	-1,00643	-0,994	-1,0008	$5,1 \times 10^{-3}$
Erro de Não Ortogonalidade (rad)	x	0,00018	0,00018	0,00018	0
	y	0,00182	0,00182	0,00182	0
	z	0,00167	0,00167	0,00167	0

Tabela 5: Calibração pelo Método Multi-Posições – InertiaCube3™

InertiaCube3					
Erro	Eixo	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Desvio Padrão
Deriva (g)	x	-0,05158	-0,0676	-0,06344	$6,8 \times 10^{-3}$
	y	-0,00809	0,01121	-0,00968	$9,5 \times 10^{-3}$
	z	-0,04434	-0,05727	-0,07045	$1,1 \times 10^{-2}$
Erro de Fator de Escala (10^3 ppm)	x	-1,99638	-1,99508	-1,99498	$6,4 \times 10^{-4}$
	y	-0,99057	-0,98903	-0,99157	$1,1 \times 10^{-3}$
	z	-0,99456	-0,99495	-0,99481	$1,6 \times 10^{-4}$
Erro de Não Ortogonalidade (rad)	x	0,00018	0,00018	0,00018	0
	y	0,00182	0,00182	0,00187	$2,4 \times 10^{-5}$
	z	0,00167	0,00167	0,00174	$3,4 \times 10^{-5}$

Tabela 6: Calibração pelo Método Multi-Posições – MTi-G™

MTi-G					
Erro	Eixo	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Desvio Padrão
Deriva (g)	x	0,0126	0,02722	0,01037	$7,4 \times 10^{-3}$
	y	0,01099	0,0153	0,01359	$1,7 \times 10^{-3}$
	z	-0,01392	0,01931	0,0221	$1,6 \times 10^{-2}$
Erro de Fator de Escala (10^3 ppm)	x	-1,99985	-1,99967	-1,99867	$5,1 \times 10^{-4}$
	y	-0,99094	-0,99215	-0,99468	$1,5 \times 10^{-3}$
	z	-0,99568	-0,98907	-0,99281	$2,7 \times 10^{-3}$
Erro de Não Ortogonalidade (rad)	x	0,00001	0,00001	0,00001	0
	y	0,00018	0,00018	0,00018	0
	z	0,00017	0,00017	0,00017	0

Sendo g uma unidade de aceleração definida como $9,80665 \text{ m/s}^2$, o que equivale a aproximadamente à aceleração devida à gravidade na superfície da Terra.

Conforme exposto na seção 5, realizou-se um teste em campo com o objetivo de verificar se a aplicação dos parâmetros de calibração calculados. A Figura 6(a) ilustra o deslocamento calculado a partir das acelerações Colibri™, antes da aplicação dos parâmetros de calibração. Nesta figura pode-se observar que conforme há um afastamento do ponto de partida, o deslocamento passa a apresentar maior discrepância com relação ao trajeto de referência. Isso deve-se ao fato de que os acelerômetros acumulam erros ao longo do tempo, resultando na perda de confiabilidade das acelerações medidas. No deslocamento calculado após a aplicação das correções, Figura 6b, apesar do trajeto ainda possuir algumas discrepâncias com relação ao trajeto de referência, pode-se observar uma visível melhora com relação ao deslocamento calculado sem as correções. Neste os contornos apresentam-se mais preservados e o ponto final mais próximo do ponto final de referência.

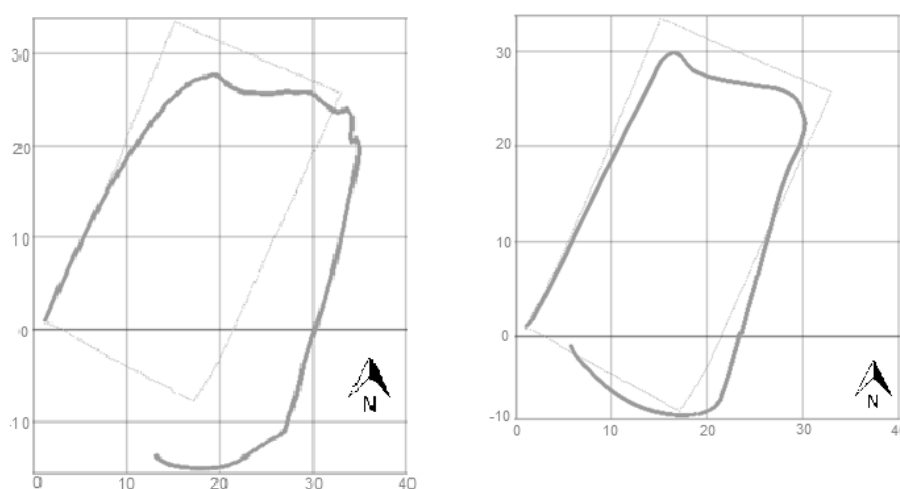


Figura 6: Trajetória Colibri™ (a) antes e (b) após as correções

A Figura 7(a) apresenta o deslocamento calculado a partir das acelerações do InertiaCube3™, antes da aplicação dos parâmetros de calibração. Assim como ocorre com os acelerômetros Colibri™, os dados dos acelerômetros InertiaCube3™ perdem confiabilidade com o passar do tempo. O trajeto realizado apresenta deformação nos contornos e nas distâncias.

O resultado da aplicação dos parâmetros de calibração pode ser visualizado na Figura 7(b). Nesta figura observa-se uma melhora significativa nos deslocamentos calculados após a aplicação das correções, com as distâncias mais preservadas e o ponto final mais próximo do ponto final de referência.

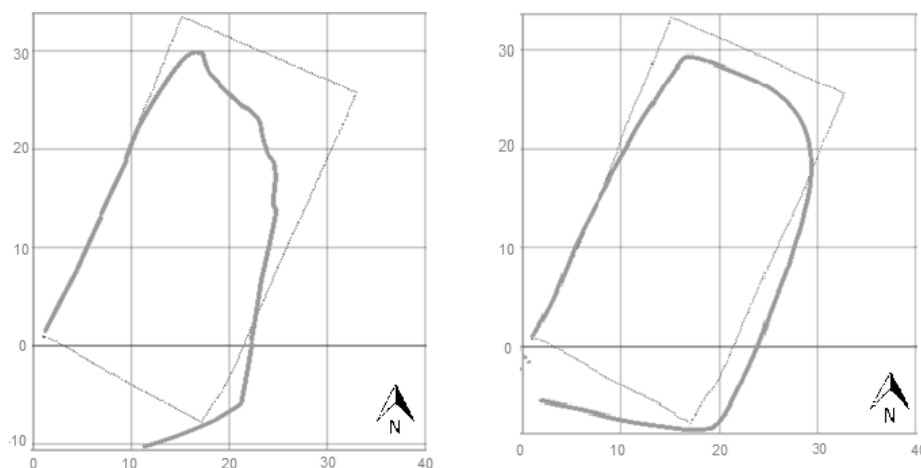


Figura 7: Trajetória InertiaCube3™ (a) antes e (b) após as correções

As Figuras 8 (a) e (b) ilustram os deslocamentos calculados a partir dos acelerômetros MTi-G™ antes e após a aplicação das correções, respectivamente. Com relação aos testes de trajetória anteriores citados, os dados deste sensor apresentam os melhores resultados. Conforme se pode verificar, após a aplicação das correções, o trajeto é o que mais se aproxima do trajeto de referência. Ainda assim, o último ponto do deslocamento aparece afastado do ponto inicial/final de referência.

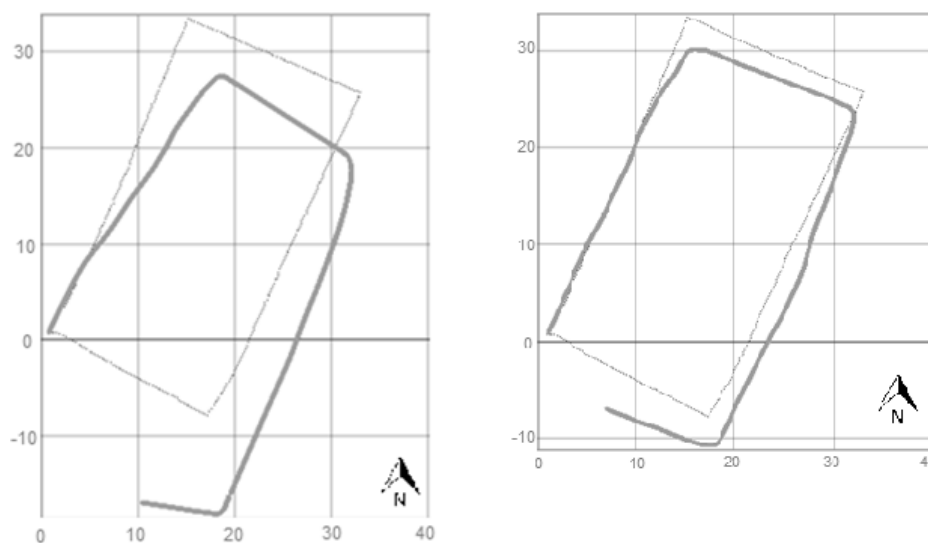


Figura 8: Trajetória MTi-G™ (a) antes e (b) após as correções

Uma outra forma de se avaliar o rendimento deste teste consiste em se considerar o ponto inicial e final como sendo um ponto de controle. Se as medições dos acelerômetros fossem perfeitas, a distância entre estes deveria ser igual à zero uma vez que o trajeto foi iniciado e finalizado no mesmo ponto. A Tabela 7 apresenta os resultados desta verificação.

A menor distância entre o ponto inicial/final foi obtida pelos deslocamentos das acelerações Colibri™. Em contrapartida, apesar dos acelerômetros MTi-G™ apresentarem visualmente o melhor ajuste com relação ao trajeto de referência, este apresentou as maiores distâncias entre o ponto inicial/final do trajeto realizado.

Tabela 7: Distância Entre o Ponto Inicial/Final

Dispositivos	Distâncias (m)		
	<i>Colibri</i>	<i>InertiaCube3</i>	<i>MTi-G</i>
Antes das Correções	15,3	18,8	17,2
Após as Correções	1,6	5,1	9,6

7. Considerações Finais

Analisando os resultados dos experimentos de calibração foi verificado que os parâmetros dos erros de fator de escala e de não-ortogonalidade sofrem pouca ou nenhuma variação para calibrações executadas em diferentes ensaios. A maior variabilidade é verificada para o erro de deriva. Estes resultados apresentam-se de acordo com o esperado, visto que a deriva é a principal fonte de erros sistemáticos.

A partir dos resultados dos experimentos realizados, conclui-se que a calibração pelo Método Multi-Posições Modificado é um método eficiente, rápido e simples de ser executado, além de não exigir custos adicionais. Constatou-se que este método de calibração é especialmente eficaz para ser aplicado em campo antes de cada utilização, uma vez que a deriva dos acelerômetros apresenta variação a cada vez que o equipamento é ligado. Além do mais, não há necessidade de se realizar esta calibração por meio de equipamentos em laboratório.

A partir do experimento de verificação pode-se comprovar que a aplicação das correções resulta em uma melhora significativa nos deslocamentos ao longo do trajeto realizado. Esta melhora visual de ajuste com relação ao trajeto de referência foi observada para os deslocamentos calculados a partir das acelerações dos três equipamentos avaliados, em especial para o MTi-G™. Em contrapartida, quando comparadas as distâncias obtidas com relação a um ponto de controle verificou-se que os acelerômetros Colibri™ obtiveram o melhor rendimento. Porém, ainda é possível observar uma discrepância com relação aos dados de referência. Esta discrepância é causada pelo fato de que a calibração não permite determinar e corrigir todos os erros sistemáticos de um sensor. Da mesma forma que não é possível realizar uma perfeita modelagem de todos os ruídos aleatórios presentes nas acelerações medidas.

Assim, pôde-se concluir que apesar das limitações dos acelerômetros, os parâmetros de erros foram calculados e aplicados com êxito. Conclui-se ainda que o conhecimento das componentes de erro dos acelerômetros MEMS obtidas por processos de calibração possibilitam aperfeiçoar o desempenho de tais dispositivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aggarwal, P.; Syed, Z.; Niu, X.; El-Sheimy, N. “A Standard Testing and Calibration for Low Cost MEMS Inertial Sensors and Units.” *Journal of Navigation* 61 (2008): 323-336. Accessed January, 2015, doi:10.1017/S0373463307004560.

- Aggarwal, P.; Syed, Z.; El-Sheimy, N. “*MEMS-Based Integrated Navigation.*” Boston: Artec House, 2010.
- Artese, G.; and Trecroci, A. “Calibration of a Low Cost MEMS INS Sensor for an Integrated Navigation System.” *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XXXVII (2008): Part B5.
- Aydemir, G. A.; Saranlb, A. “Characterization and calibration of MEMS inertial sensors for state and parameter estimation applications”. *Measurement*. Volume 45, Issue 5, June 2012, Pages 1210–1225
- Bender, D.; Schikora, M.; Sturm, J.; Cremers, D. “Graph-based bundle adjustment for INS-camera calibration”. Paper presented at the conference Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g), Rostock, Germany, September 4-6, 2013.
- Brown, R. G.; Hwang, P. Y. C. *Introduction to random signals and applied Kalman filtering*. 3.ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- Durão, C. R. C. “Utilização de Unidades de Medidas Inerciais Baseadas em Sistemas Microeletromecânicos em Navegadores Integrados”. PhD diss., Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- Ferguson, J. “Calibration of Deterministic IMU Errors”. PhD diss., Embry-Riddle Aeronautical University, 2015.
- Guan, W.; Meng, X.; Dong, X. “Calibration of accelerometer with multicomponent inputs”. Paper presented at Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, Montevideo, Uruguay, 12-15 May, 2014.
- Grewal, M. S.; Andrews, A. P. *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. 2. ed. Canada: Wiley-Interscience, 2007.
- Groves, P. D. *Principles of GNSS, Inertial, and Multi-sensor Integrated Navigation Systems*. Norwood: Artech House, 2008.
- Henriques, B. S. M. “Estimation and Control of a Quadrotor Attitude”. PhD diss., Technical University of Lisbon, 2011.
- Hol, J. “Sensor Fusion and Calibration of Inertial Sensors, Vision, Ultra-Wideband and GPS”. PhD diss., Linköping University, 2011.
- Lambrecht, S.; Nogueira, S. L.; Bortole, Magdo.; Siqueira, Adriano A. G.; Terra, Marco H.; Rocon, Eduardo; Pons, José L. “Inertial Sensor Error Reduction through Calibration and Sensor Fusion”. *Sensors (Basel)*. (2016), 235. Accessed April 2, 2016. doi: 10.3390/s16020235.
- Lima, S. R. S. “Integração GPS/INS Utilizando Sensores Inerciais Baseados em Sistemas Microeletromecânicos (MEMS)”. PhD diss., Universidade Federal do Paraná, 2005.
- Lötters, J. C.; Schipper, J.; Veltink, P. H.; Olthuis, W.; Bergveld, P. “Procedure for in-use calibration of triaxial accelerometers in medical applications.” *Sensors and Actuators A: Physical*, 68 (1998): 221-228.
- Niu, X.; Li, Y.; Zhang, H.; Wang, Q.; Ban, Y. “Fast Thermal Calibration of Low-Grade Inertial Sensors and Inertial Measurement Units”. *Sensors* (2013), 13(9), 12192-12217. Accessed April 2, 2016. doi:10.3390/s130912192
- Santana, D. D. S. “Navegação Terrestre Usando Unidade de Medição Inercial de Baixo Desempenho e Fusão Sensorial Com Filtro de Kalman Adaptativo Suavizado”. PhD thesis., São Paulo University, 2011.

Shin, E.; El-Sheimy, N. "A New Calibration Method for Strapdown Inertial Navigation System." *Zeitschrift für Vermessungswesen Journal* 127 (2001): 1-10.

Syed, Z.; Aggarwal, P.; Goodall, C.; Niu, X.; El-Sheimy, N. "A New MultiPosition Calibration Method for MEMS Inertial Navigation Systems." *Measurement Science and Technology*, 18 (2007): 1897-1907. doi:10.1088/0957-0233/18/7/016

Tamazin, M.; Noureldin, A.; Korenberg, M. J. "Nonlinear modeling of the stochastic errors of MEMS inertial sensors utilized in smart phones". Paper presented at the 1st International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA), Sharjah, United Arab Emirates, February 12-14, 2013.

Tang, K.; Wang, J.; Wu, W. "A Novel INS and Doppler Sensors Calibration Method for Long Range Underwater Vehicle Navigation". *Sensors (Basel)*. (2013), Nov. 13(11). Accessed April 2, 2016. doi: 10.3390/s131114583.

Titterton, D. H.; Weston, J. L. *Strapdown Inertial Navigation Technology*. 2. ed. London: Reston, Institution of Electrical Engineers, 2004.

Recebido em dezembro de 2015.

Aceito em Agosto de 2016.